

# Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen

Dr.-Ing. Volker Frevert  
Dipl.-Ing. Dirk Stöcker  
Dipl.-Ing. Andre Nuckelt  
*Geodätisches Institut, TU Dresden*

Beitrag zur Posterausstellung

## 1 Einleitung

### 1.1 Hochpräzise Positionierung

Die Entwicklungen im Bereich der Positionsbestimmung mit GPS haben dazu geführt, dass mit dem Verfahren der relativen Positionierung und der Auswertung der Trägermischphase Genauigkeiten im Millimeterbereich erreichbar sind. Um diese Millimetergenauigkeit zu gewährleisten, müssen auch Fehlereinflüsse mit Größenordnungen Millimeter bis Zentimeter berücksichtigt werden. Einer dieser Einflüsse ist das Empfangsverhalten der GPS-Antenne. Durch individuelle Kalibrierung der GPS-Antennen kann deren Empfangscharakteristik bestimmt werden. Dabei erhaltene Parameter sind in die GPS-Auswertung integrierbar. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird dadurch erhöht [IPG 2002].

### 1.2 Motivation für die beschleunigte Feldkalibrierung

Kalibrierverfahren auf dem heutigen Stand der Wissenschaft (s. Kapitel 2) sind entweder schnell, aber relativ kostspielig (Absolutkalibrierung), oder kostengünstig und zeitaufwendig (Relativkalibrierung). Das Ziel der Automatisierungsbestrebungen lag also darin, ein einfaches, kostengünstiges System zu entwickeln, welches den Zeitbedarf minimieren kann, ohne jedoch den Aufwand einer Absolutkalibrierung vorzusetzen. Dabei sollten aber Genauigkeitseinbußen unbedingt vermieden werden.

## 2 GPS-Antennenkalibrierung

Durch die unterschiedlichen Verfahren der GPS-Antennenkalibrierung ist die Antennencharakteristik bestimmbar. Bei der Kalibrierung wird die Lage des

mittleren Antennenphasenzentrums (APZ) bestimmt und zusätzlich werden die Terme für die azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PCV) berechnet.

Grundsätzlich werden zwei Arten der Antennenkalibrierung unterschieden. Zum einen können Relativverfahren durchgeführt werden. Die erhaltenen Ergebnisse sind abhängig von der benutzten Referenzantenne. Die Alternative stellen die Absolutkalibrierungen dar, bei denen die Kalibrierwerte unabhängig von einer Referenzantenne sind. Zusätzlich wird die Absolutkalibrierung in die Verfahren der Kammerkalibrierung und der Feldkalibrierung unterteilt.

### 2.1 Absolute Kammerkalibrierung

Die absolute Kammerkalibrierung erfolgt in einem mikrowellentoten Raum (anechoic chamber). Die zu prüfende Antenne wird auf eine Vorrichtung montiert und gegenüber einer künstlichen Satellitensignalleuchte verschoben und verschwenkt. Aus der Positionsänderung bezüglich der Ausgangslage kann das mittlere APZ abgeleitet werden. Die PCV werden durch Diskretisierung der gemessenen Phasenkurven erhalten.

### 2.2 Absolute Feldkalibrierung

Das absolute Feldverfahren ist eine Kalibriermethode, die mit konventionellen GPS-Beobachtungen durchgeführt wird. Es wird eine Basislinie beobachtet und ausgewertet. Durch bestimmte Auswerteprozeduren werden anschließend die absoluten Korrekturwerte berechnet. Obwohl die zu kalibrierende Antenne und eine weitere Antenne diese Basislinie bilden, ist das Verfahren ein absolutes Kalibrierverfahren, da die zweite Antenne nur eine "Hilfsfunktion" ausübt und die Ergebnisse (APZ und PCV) völlig unabhängig von der

Empfangscharakteristik dieser Antenne erhalten werden [Menge u. Seeber 1999].

Das wesentliche Grundprinzip der absoluten Feldkalibrierung besteht darin, die Effekte der stationsabhängigen Fehlerkomponenten PCV und Mehrwegeausbreitung von einander zu trennen und den Mehrwegefehler zu eliminieren. Dafür ist eine spezielle Beobachtungskonfiguration notwendig, bei der die Position und Ausrichtung der Prüflingsantenne gegenüber der stationären Hilfsantenne epochenweise pseudozufällig mittels Roboter variiert.

Grundlage der Auswertung sind die undifferenzierten Beobachtungsgleichungen die sich für diejenigen Beobachtungen ergeben, die während der Drehung und Kippung der Antenne aufgezeichnet wurden. Zusätzlich zu den standardmäßig verwendeten Parametern der GPS-Ausgleichung für kurze Basislinien werden über die hohe Korrelation von Mehrwegeeinflüssen zwischen zwei aufeinander folgenden Epochen Mehrwege-Parameter als stochastische Prozesse mitgeschätzt. Durch schnelle Orientierungsänderungen des Roboters ist die Trennung zwischen Mehrwegeeffekt und PCV möglich. Die als Triple-Differenzen bezeichneten Zeitdifferenzen aufeinander folgender Doppeldifferenzen sind frei von Mehrwegefehlern. Aus der Differenz der PCV zweier verschiedener Antennenorientierungen bezüglich identischer Satelliten ist eine Bestimmung der absoluten PCV möglich.

### 2.3 Relative Feldkalibrierung

Das Prinzip der relativen Feldkalibrierung beruht auf der Beobachtung einer koordinatenmäßig bekannten Basislinie innerhalb eines Testfeldes. Dieses Verfahren bietet die Vorteile, dass die Kalibrierung in Gebrauchslage erfolgt und die Messung jederzeit möglich ist. Demgegenüber stehen jedoch die Nachteile: Relativbestimmung (Referenzantenne nötig) und Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation (ungleichmäßige Verteilung der Messwerte). Durch eine lange Beobachtungszeit (möglichst 24 Stunden) soll eine vollständige Satellitenüberdeckung erreicht und die Mehrwegeeinflüsse vermindert werden. Alle Differenzen zu den Basislinien-Sollkoordinaten werden als relative Phasenzentrumsfehler betrachtet.

Das Messprinzip der Antennendrehung ermöglicht die Gewinnung zusätzlicher Informationen und die Verringerung oder sogar teilweise Elimination der Mehrwegeeffekte. Unter Antennendrehung ist die Änderung der azimuthalen Ausrichtung der Antenne während der Kalibrierung zu verstehen. Zwei

entgegengesetzte Ausrichtungen (Nord und Süd) des Prüflings sind prinzipiell ausreichend, die Zuverlässigkeit lässt sich aber durch das Beobachten von vier Richtungen (Nord, Ost, Süd, West) oder mehr steigern. Pro Ausrichtung ist eine Beobachtungszeit von 24 Stunden erforderlich.

Die Auswertung unterteilt sich in die Bestimmung des mittleren APZ und der daran anschließenden Berechnung der PCV. Dabei werden absolute Werte für den Lageoffset ermittelt. Die Bestimmung des Höhenoffsets erfolgt relativ zur Referenzantenne. Der Höhenunterschied, der sich aus der Basislinienberechnung ergibt, wird mit dem nivellistisch bestimmten Höhenunterschied verglichen. Die auftretende Differenz stellt die Höhenexzentrizität in Bezug zur Referenzantenne dar. Ein absoluter Höhenoffset kann nur durch Verkippung der Antenne, also durch absolute Kalibrierverfahren, erhalten werden. Die Bestimmung der richtungsabhängigen Phasenzentrumsvariationen kann ebenfalls nur bezüglich der Referenzantenne erfolgen. Zur Modellierung werden die Residuen der Doppeldifferenzen verwendet. Die Parametrisierung wird mit Entwicklungen nach Kugelflächenfunktionen vorgenommen.

Auch im relativen Feldverfahren können absolute Kalibrierwerte ermittelt werden. Voraussetzung ist die Verwendung von absoluten Korrekturwerten für die Referenzantenne. Durch den Bezug der Korrekturwerte auf eine absolut-kalibrierte Antenne werden absolute Korrekturen für APZ und azimuth- und elevationsabhängige PCV des Prüflings erhalten. Der Einsatz mehrerer Referenzantennen kann die Zuverlässigkeit und Genauigkeit steigern.

## 3 Deutschlandweiter Vergleichstest der Kalibrierverfahren

In Deutschland werden von verschiedenen Institutionen relative und absolute Antennenkalibrierungen durchgeführt. Zur Klärung der Konsistenz der im Raum von SAPOS vorhandenen operationellen Kalibrierverfahren wurde 2001 seitens LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) und LGB (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg) ein Vergleichstest vorgeschlagen. An diese Vergleichnahmen neben der initiiierenden LGN Hannover das Institut für Erdmessung der Universität Hannover, die Geodätischen Institute der TU Dresden und Universität Bonn sowie die Geo++ GmbH teil. Im Rahmen dieses Tests wurden drei geodäti-

sche und zwei RTK-Antennen von jedem Teilnehmer kalibriert. Als Gutachterstelle fungierte das Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München, das die Ergebnisse beim 4. GPS-Antennenworkshop am 21. Mai 2002 in Hannover präsentierte [Feldmann-Westendorff u. Sorge 2002].

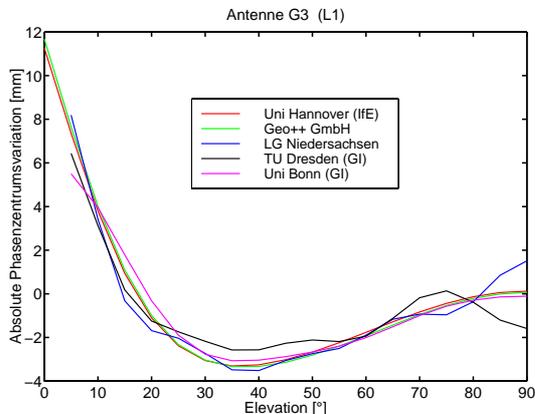


Abbildung 1: Elevationsabhängige PCV, Quelle: Schmid, R. u. Rothacher, M.: Ergebnisse und Analysen des Vergleichstests von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen, S. 5

Für einen aussagekräftigen Vergleich müssen die einzelnen Kalibrierergebnisse jeweils für L1 und L2 auf einen einheitlichen Offset (APZ) bezogen werden. Die PCV werden auf diesen Offset umgerechnet und ein ungewichtetes Mittel gebildet. Desweiteren ist für jeden Kalibrierdatensatz ein konstanter Versatz gegenüber dem Mittel bestimmt und eliminiert worden. Der Vergleich erhaltenen PCV-Werte für die geodätische Antenne G3 in Abbildung 1 ergibt eine gute Übereinstimmung. Alle Kalibrierstellen ermittelten für diese Antenne ein nahezu identisches Empfangsverhalten für L1. Dieses Ergebnis wird durch die Analyse der Kalibrierwerte für die ebenfalls geodätische Antenne G1 in der Abbildung 2 bestätigt. Jedoch sind für die Trägerphase L2 Unterschiede zwischen den Kalibrierverfahren feststellbar. Diese spiegeln sich am deutlichsten im Diagramm für die Verbesserungen gegenüber dem errechneten Mittel für L2 wider. Im Gegensatz zu den geodätischen Antennen konnte für die Kalibrierergebnisse der RTK-Antennen keine vergleichbar gute Übereinstimmung nachgewiesen werden [Schmid u. Rothacher 2002].

Die auftretenden Differenzen in den Kalibrierdaten der verschiedenen Institutionen können durch die unterschiedlichen Kalibrierverfahren begründet werden. Durch die Eliminierung des Mehrwegefehlers bei der Absolutkalibrierung mit dem Roboter, durchgeführt bei IfE und Geo++, werden die stationsabhängigen Störeinflüsse sehr stark reduziert. Das führt dazu,

dass die entsprechenden PCV-Kurven nahezu identische Verläufe aufweisen. Bei den Relativkalibrierungen (TU Dresden, Uni Bonn und LGN) können die spezifischen Umgebungseinflüsse nur teilweise minimiert werden, was vermutlich zu den Unterschieden in den zugehörigen Kurven führt.

Resümee des Vergleichs ist, dass die verschiedenen Kalibrierverfahren generell gut übereinstimmen [Menge 2002]. Es führt jedoch zu größeren Fehlern, wenn die Kalibrierwerte unterschiedlicher Verfahren in Basislinien oder Netzen kombiniert werden.

Aus dem deutschlandweiten Vergleich der Kalibrieranbieter kann man den Schluß ziehen, dass eine Weiterentwicklung der Feldkalibrierung auch im Zeitalter der Absolutkalibrierung immer noch sinnvoll bleibt. Insbesondere der geringere Kostenaufwand ist bei größeren GPS-Netzen von Vorteil. Auch die Möglichkeit, mehrere Kalibrierungen parallel vorzunehmen, ist ein nicht zu unterschätzender Bonus.

Abhängig von den Forschungen zur Detektion und Korrektur von Mehrwegeeffekten [Wildt 2002] besteht die Möglichkeit, die noch vorhandenen Unterschiede der Ergebnisse zwischen Absolut- und Feldkalibrierung weiter zu minimieren.

## 4 Beschleunigung der einfachen Feldkalibrierung

### 4.1 Grundgedanke der Beschleunigung

Der Zeitaufwand für eine relative Feldkalibrierung mit vier Ausrichtungen umfasst inklusive Auf- und Abbau eine Woche. Nach jeweils 24 Stunden sind manuelle Eingriffe zum Drehen der zu kalibrierenden Antenne notwendig. Aufgrund der langen Beobachtungszeit und der sich nur langsam ändernden Satellitengeometrie wird mit einer Datenrate von 60 Sekunden beobachtet. Gelingt es, die Antenne innerhalb dieser 60 Sekunden zeitsynchron zur GPS-Zeit in drei weitere Richtungen zu drehen und verkürzt dann die Aufzeichnungsrate auf 15 Sekunden, liegt nach 24 Stunden je ein Datensatz der vier Ausrichtungen mit jeweils 60 Sekunden Datenrate vor. Bei entsprechend guter Zeitsynchronisation und ausreichender Drehgeschwindigkeit sind auch eine größere Anzahl an Ausrichtungen und/oder geringere Datenraten möglich, z. B. sechs Ausrichtungen bei 10 Sekunden Datenrate.

## Antenne G1

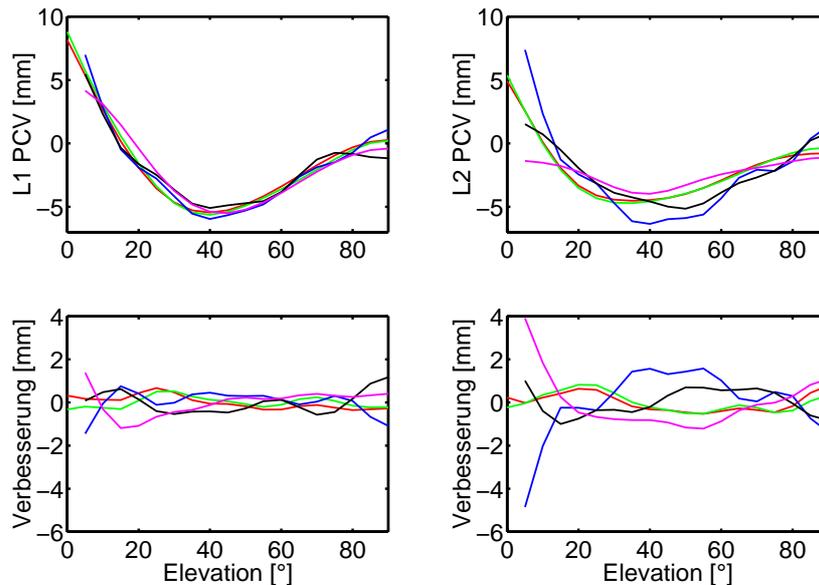


Abbildung 2: Elevationsabhängige PCV und Verbesserungen, Quelle: Schmid, R. u. Rothacher, M.: Ergebnisse und Analysen des Vergleichstests von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen, S. 6

## 4.2 Anforderungen an das Kalibriersystem

Ziel der Entwicklung war ein System, welches folgende Eigenschaften aufweisen soll:

- Möglichkeit zur gleichzeitigen, jedoch zeitlich unabhängigen Kalibrierung von mindestens 4 GPS-Antennen
- Unabhängige Einstellung der Parameter Kalibrierdauer, Anzahl der Ausrichtungen und Dauer eines Zyklus für jede Antenne
- Autonomer Betrieb mit selbständiger Erkennung und Benachrichtigung bei Fehlern
- Möglichkeit der Fernabfrage über den Status der Kalibrierung
- Mobiles, d.h. leicht zu transportierendes System, das auch an anderen Kalibrierstandorten eingesetzt werden kann
- Geringe Systemkosten
- (All-)Wettertauglichkeit

Industriell gefertigte Baugruppen (z. B. Drehvorrichtung, Motorsteuerung, Steuersoftware), die als Systemkomponenten eingesetzt werden sollten, erfüllten diese Anforderungen nicht.

Für die Automatisierung der Drehbewegung eignen sich Schrittmotoren, da diese die exakte Ausrichtung

der Antenne auf ein beliebiges Azimut mit geringem Aufwand realisieren. Verfügbare Hard- und Software zur Ansteuerung der Schrittmotoren erfüllt jedoch nicht die o.g. Eigenschaften

Die gleiche Genauigkeit und Flexibilität wird mit herkömmlichen Getriebemotoren nur durch einen zusätzlichen inkrementellen oder codierten Winkelabgriff, der ebenfalls zusätzliche Hard- und Softwareentwicklung notwendig machen würde, erreicht.

Deshalb wurde ein Kalibriersystem auf Basis eines Schrittmotors mit folgenden Komponenten entwickelt:

- Mechanische Drehvorrichtung
- Mikroprozessorgestützte Schrittmotorsteuerung einschließlich Firmware
- Steuerprogramm mit Bedienoberfläche

## 4.3 Realisierung

Abbildung 3 zeigt den Systemaufbau. Von einem PC aus erfolgt die Ansteuerung von 4 (max. 16) Schrittmotoren. Die Verbindung erfolgt bis zur Kalibrierplattform über Internet oder Intranet. Ein COM-Port-Server wandelt die per TCP/IP übertragenen Steuerbefehle in einen seriellen Datenstrom (und umgekehrt). Diese Befehle werden durch die Schrittmotoransteuereinheit interpretiert und in Impulse für den Schrittmotor umgesetzt. Durch den Einsatz des

COM-Port-Servers, der mit geringen Aufwand allwettertauglich gemacht werden kann, ist der Standort des Steuerrechners variabel. Die Zeitsynchronisation erfolgt stündlich über eine Internetverbindung (NTP-Protokoll) zu einem Zeitserver, z.B. den von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB). Alternativ ist der Einsatz eines DCF77-Empfängers oder der direkte Zeitabruf am GPS-Empfänger möglich. Durch die Software (siehe Kapitel 4.6) sind mehrere Überwachungs- und Kontrollmöglichkeiten realisiert.

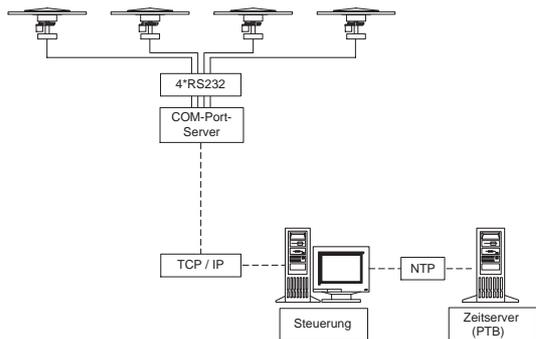


Abbildung 3: Systemübersicht Kalibriersystem

#### 4.4 Hardware & Mechanik

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Drehvorrichtung nimmt den Platz des Adapters ein, welcher normalerweise benutzt wird, um die Antenne im Dreifuß zu befestigen. Der mechanische Teil besteht im wesentlichen aus zwei gegeneinander beweglichen Teilen und einem Schrittmotor, welcher die Bewegung steuert. Die Anschlussleitungen für diesen Motor und eine Licht- (oder Magnet-)Schranke führen von diesem Gerät zu einer Steuereinheit.

Die massive Bauform der Dreheinheit mit außenliegendem leistungsfähigen Schrittmotor ermöglicht auch die Bewältigung größerer Antennenmassen (z. B. Trimble Choke-Ring). Durch Feinabstimmung der Drehbewegung mit Anlauf- und Ausklingphase wird auch bei diesen Antennentypen eine präzise Ausrichtung erreicht. Trägheitseffekten durch hohe Beschleunigung und abruptes Bremsen konnte damit entgegengewirkt werden. Die maximal notwendige Winkeländerung von 180 Grad (bei 4 Ausrichtungen) wird dennoch innerhalb weniger Sekunden erzielt.

#### 4.5 Schrittmotor-Steuerelektronik

Zur Ansteuerung von Schrittmotoren existiert eine Vielzahl von Lösungen in allen Preisbereichen. Um jedoch das Ziel einer preiswerten Lösung nicht



Abbildung 4: Kalibriermechanik im Einsatz (ohne Wetterschutz)

zu verfehlen, wurde auf eine Eigenentwicklung zur Steuerung zurückgegriffen. Auf Basis eines Atmel-Mikrocontrollers entstand eine Steuerschaltung, die einfache Kommandofolgen entgegennimmt und den Schrittmotor entsprechend dieser Kommandos ansteuert. Die Kommandosprache umfasst einfache Befehle zum Drehen in beide Richtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Für die Anwendung der Antennenkalibrierung werden Kommandos zum direkten Einstellen eines bestimmten Winkelwertes genutzt.

Als Interface zur Ansteuerung wird eine reguläre RS-232 Schnittstelle mit den üblichen Einstellungen von 9600 Bit/s (keine Parität, 8 Datenbits, 1 Stoppbit) genutzt. Diese Wahl bietet Kompatibilität mit nahezu allen verfügbaren Rechnersystemen. Außerdem ist der Einsatz einer seriellen Schnittstelle im Atmel-Mikroprozessor sehr einfach realisierbar. Eine Möglichkeit zur Veränderung der Schnittstellenparameter ist aufgrund der geringen Datenraten nicht sinnvoll (jedoch einfach zu realisieren). Für zukünftige Entwicklungen bietet sich möglicherweise der Einsatz von USB an, da moderne Rechner nicht unbedingt mit seriellen Schnittstellen ausgestattet sind. Momentan ist der Aufwand allerdings noch zu hoch.

Der Atmel-Prozessor erwies sich als einfach zu programmierendes Werkzeug und erleichterte die Entwicklung enorm. Ein Treiberschaltkreis zur Ansteuerung des Schrittmotors übernimmt die Feinheiten der Schrittmotorsteuerung und ermöglichte die Konzentration der Arbeiten auf die projektspezifischen Fragen: Die Leistungskraft des Schrittmotors, die maximale und minimale Drehgeschwindigkeit, Fehler-sicherheit und Schutz vor Überdrehen und damit Zerstörung des Antennenkabels und ähnliches.

Die Trennung der Entwicklung in Steuereinheit und Kalibrierungssoftware erlaubt eine Nutzung des

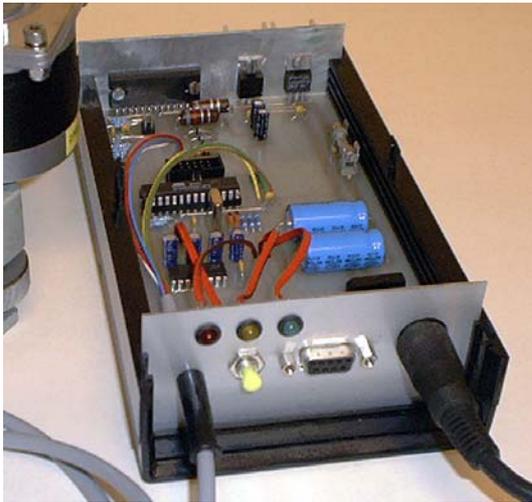


Abbildung 5: Schrittmotorsteuerung

Gerätes auch außerhalb der Aufgabenstellung "Antennenkalibrierung". So wurde die Dreheinrichtung im Rahmen einer Diplomarbeit zur Analyse der automatischen Zielverfolgung eines Tachymeters eingesetzt. Diese Aufgabe erforderte eine kontinuierliche Drehbewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, wobei jedoch keine Anpassung der Firmware nötig war [Hubrig 2002].

Neben der Hardware zur Steuerung wird außerdem eine Windows-basierte Steuersoftware genutzt. Diese Software steuert vier oder mehr Antennen und protokolliert alle während der Kalibrierung anfallenden Daten. Dabei zeigte sich auch, dass ein modernes Windowssystem viel zeitkritischer ist als ein 8MHz-Einchip-Mikroprozessor. Die Wahl einer rein computergestützten Lösung ist auch aus heutiger Sicht nicht empfehlenswert, zumal die meisten PCI-Steckkarten zur Schrittmotorsteuerung relativ teuer sind.

#### 4.6 Windows-Steuersoftware

Zur Ansteuerung von mehreren Kalibriersystemen wurde das Programm AAKDD mit Windows-Bedienoberfläche (siehe Abb. 6) entwickelt, dessen Hauptaufgabe die zeitliche Synchronisation zwischen Mess- und Aufzeichnungszeitpunkt des Empfängers, der GPS-Systemzeit, einerseits und der Drehbewegung der Antenne andererseits ist. Über entsprechende Bedienelemente lassen sich getrennt für jeden Kalibriervorgang die Parameter einstellen, der Vorgang starten bzw. beenden und Zusatzinformationen eingeben. Für jede Antenne wird ein Protokoll über den Verlauf, die Parameter der Kalibrierung und die sonstige Angaben, z. B. Antennennummer und -typ, erzeugt.

Zur Kontrolle des Kalibriervorganges ermöglicht das

Programm in regelmäßigen Abständen oder beim Auftreten von Fehlern das automatische Versenden von e-Mails mit Informationen über den Kalibrierstatus. Außerdem kann eine sofortige Abfrage mit einem Internetbrowser (z. B. Netscape) von einem beliebigen Standort aus erfolgen.

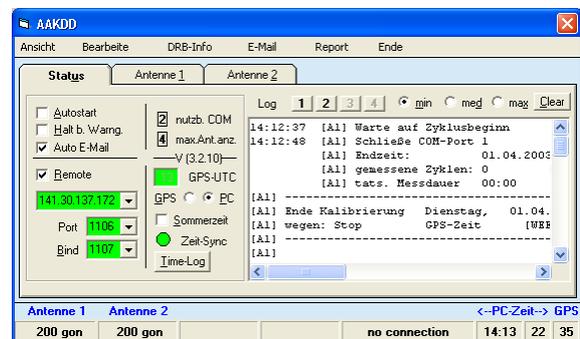
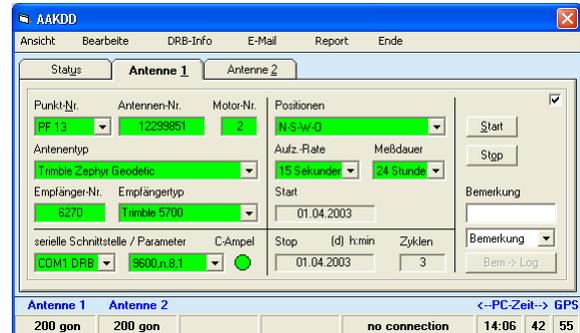


Abbildung 6: AAKDD Windows-Bedienoberfläche

#### 4.7 Auswertung

Die Auswertung der Kalibriermessungen erfolgt in bewährter Weise wie bei der klassischen Methode mit WaSoft/Kalib Version 3.1 [Wanninger 2002b].

Nach dem Auslesen der GPS-Rohdaten für die zu kalibrierende Antenne und deren Wandlung in RINEX-Format erfolgt eine Aufteilung der RINEX-Beobachtungen in meist vier Dateien, die dann nur noch die Daten der jeweiligen Ausrichtung enthalten. Mit diesen Daten und den Daten der Referenzstation, die in gleicher Weise bearbeitet werden, erfolgt die Basislinienauswertung und schließlich die Bestimmung der Kalibrierwerte. Damit unterscheidet sich die Auswertung nicht von der herkömmlichen Berechnung. Einzige Besonderheit ist die zusätzliche Option zum Splitten der RINEX-Datei.

#### 4.8 Schlussbetrachtung

Das Hauptziel der Entwicklungen zur beschleunigten Feldkalibrierung, die Zeitersparnis, wurde erreicht. Die benötigte Zeit für Messung und Auswertung einer

Kalibrierung wurde von einer Woche auf weniger als zwei Arbeitstage reduziert.

Ein positiver Effekt dieser Beschleunigung ist eine Verringerung des Fehlereinflusses aufgrund unterschiedlicher Mehrwegebedingungen bei unterschiedlichen Antennenausrichtungen. So wurde insbesondere die Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen stark reduziert.

Die vorliegende Hard- und Softwarelösung erlaubt eine deutlich schnellere Feldkalibrierung von GPS-Antennen. Durch den Einsatz mehrerer absolutkalibrierter Referenzantennen können zuverlässig absolute Kalibrierwerte für die Prüflinge ermittelt werden. Neben den Vorteilen für den Auftraggeber ermöglicht die vorliegende Lösung auch umfassende wissenschaftliche Untersuchungen zu weiteren, insbesondere stationsabhängigen, Fehlereinflüssen.

## Literatur

- [Feldmann-Westendorff u. Sorge 2002] Feldmann-Westendorff, U., B. Sorge (2002): Vergleichstest von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen, 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 21.05.2002
- [Hubrig 2002] Hubrig, M. (2002): Untersuchung zum Monitoring-System und automatischen Zielerfassung mit dem TCA 2003, Diplomarbeit am Geodätischen Institut der TU Dresden, 2002, unveröffentlicht
- [IPG 2002] Institut für Planetare Geodäsie der TU Dresden (2002): Erläuterungsbericht zum Werkvertrag über die Vermessung und Auswertung der Hierarchiestufe C des ETRF im Freistaat Sachsen, SNREF 2002
- [Menge u. Seeber 1999] Menge, F., G. Seeber (1999): Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariation von GPS-Antennen, DGK Reihe B, Nr. 310, München 1999
- [Menge 2002] Menge, F. (2002): Vergleichstest von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen - Analysen Institut für Erdmessung, 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 21.05.2002
- [Schmid u. Rothacher 2002] Schmid, R. und M. Rothacher (2002): Ergebnisse und Analysen des Vergleichstests von Kalibrierverfahren für GPS-Antennen, 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 21.05.2002
- [Wanninger 2002a] Wanninger, L. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung, ZfV 1/2002, S. 51-58
- [Wanninger 2002b] Wanninger, L. (2002): Anleitung WaSoft/Kalib 3.1, Ingenieurbüro Wanninger, 2002
- [Wildt 2002] Wildt, S. (2002): Untersuchungen über den Einfluss von Mehrwegeeffekten bei GPS-Anwendungen, Aufsatz, Geodätisches Institut der TU Dresden, unveröffentlicht
- [Wübbena u. a. 2000] Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000): Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time, Proc. International Technical Meeting, ION GPS-00, Salt Lake City, Utah, USA, 19.-22.09.2000